

研究種目:基盤研究(C)

研究期間:2007~2008

課題番号:19560341

研究課題名(和文) 395GHz/100W/CW ジャイロトロンの開発と DNP-NMR への応用

研究課題名(英文) Development of a 395GHz/100W/CW gyrotron and its application to DNP-NMR

研究代表者

出原敏孝(IDEHARA TOSHITAKA)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号 80020197

研究成果の概要:

電子スピン共鳴(ESR)によりスピンのエネルギーレベル遷移を促し、非平衡分布を形成することにより生じる巨大な電子スピン分極を核スピンの移行して、NMR装置の感度を向上するためのDNP(動的核分極)法をサブテラヘルツ波領域で新たに開発し、蛋白質分子の構造解析に応用するための高出力サブテラヘルツ光源として、395GHzで安定にCW動作する出力50Wの二次高調波ジャイロトロンを開発した。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード:光源技術、テラヘルツ、磁気共鳴、蛋白質、計測工学

1. 研究開始当初の背景

蛋白質構造解析の手段として、X線による解析とともに、核磁気共鳴(NMR)による解析が有力視されている。しかしながら、NMRの感度の低さが現実に利用する際の最大の難点となっている。この点を解決するために、電子スピン共鳴(ESR)を利用し、核スピンの比べて巨大な電子スピン分極を核スピンの移動して、NMRの感度を向上する動的核分極(DNP)の方法が用いられる。極低温でDNPを行うことにより、室温NMRの感度に比べて約1000倍の感度向上が達成できる。(A. Abragam and M. Goldman: Nuclear

Magnetism, Clarendon Press, Oxford, (1982)). 一方、高分解能を得るためには、高磁場でのDNPを行う必要がある。このDNPによる感度向上の原理は、オーバーハウザー効果として知られている。(A.W. Overhauser: Phys. Rev. 92(1953)411.) しかし、現実にこの方法を行うためには、高磁場で電子スピン共鳴(ESR)を行い、スピンのレベル分布を反転させるための光源として、サブミリ波領域で安定に動作する高出力光源が必要である。例えば、10テスラから15テスラの強磁場のもとでの実験には、0.5から0.7THzの高周波・高出力光源を必要とする。

現在、広範に使用されている600MHzのプロトンNMRの場合には、395GHzの光源が必須となる。

このようなサブテラヘルツ(サブミリ波)領域で安定に動作する高出力光源は、いまだかつて開発されたことのない新たな領域の光源である。福井大学遠赤外領域開発研究センターでは、サイクロトロンメーザー作用を用いたジャイロトロンの特長、即ち、1) 発振周波数がサイクロトロン周波数またはその高調波周波数で決まり、高周波数においても微細な構造を必要としないこと、2) 従って、熱許容量を大きくできることから、大電流電子ビームの入射が可能となり、高出力動作に適していること、3)サブミリ波領域において、20-30パーセントの高効率動作が期待できること、に着目し、高磁場と高次高調波を用いた高周波ジャイロトロンを開発を行ってきた。現在までに、パルス動作で1テラヘルツを超えるジャイロトロン(Gyrotron FU Series)の開発に成功し(T. Idehara et al.: Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 27(2006)319.)、最近、CW動作するジャイロトロン(Gyrotron FU CW Series)の開発に着手した。(T. Idehara et al., Digest of IRMMW-THz 2006, p.209) 現状で、0.3THz で 出力1.8kW のジャイロトロン(Gyrotron FU CW I)の開発に成功している。

福井大学遠赤外領域開発研究センターは、600MHz-NMRに必要なサブテラヘルツ領域で安定に動作する100W級の高出力光源を提供することのできる唯一の機関である。本研究では、当センターのこれまでの実績を基盤として、600MHz-NMRにDNPの手法を取り入れるための光源-395GHz/100W/CWジャイロトロンを開発を行い、NMR実機への応用を実現するものである。

2. 研究の目的

サブテラヘルツ光をサンプルに照射し、電子スピン共鳴(ESR)によりスピンのエネルギーレベル遷移を促し、非平衡分布を形成することにより生じる巨大な電子スピン分極を核スピンに移行して、NMR装置の感度を向上するためのDNP(Dynamic Nuclear Polarization,動的核分極)法をサブテラヘルツ波領域で新たに開発し、蛋白質分子の構造解析に応用する。本研究

では、このための高出力サブテラヘルツ光源として、高周波領域で高効率かつ高出力動作が可能なジャイロトロンの特長を活かして、395GHzで安定にCW動作する出力100Wの二次高調波ジャイロトロンを開発する。

3. 研究の方法

平成19年度

1) 395GHz/100W/CWジャイロトロン最適設計

計算機シミュレーションにより、以下の各部品の最適設計を行う。

1-1 既存の8テスラ・液体ヘリウムフリー超伝導マグネットと電子銃領域の補助磁場コイルを用いた磁場発生装置内での3極マグネトロン入射型電子銃の動作の解析により、発生する電子ビームの軌道を追跡し、空間電荷効果による速度広がり、磁場に垂直な方向の速度成分、空洞共振器内での入射半径、コレクターへの入射位置を求め、それぞれのパラメーターを総合的に勘案した最適設計を試みる。

1-2 電子ビームが入射されたとき、空洞共振器内に励起される共振器モードの解析を行い、複数個のモード間の競合を取り入れたコードにより、各モードの時間的成長、競合による抑制、定常状態に達したときに生き残るモードとその振幅を求める。特に、本研究で開発するジャイロトロンが2次高調波動作によるものであるため、定常状態に達したとき2次高調波による動作が基本波動作に打ち勝って単独で生き残る条件を探求する。かくして、空洞共振器形状の最適設計を行う。

1-3 開発するジャイロトロンが、連続(CW)動作することに鑑み、コレクターの設計を入念に行う必要がある。電子ビームの衝撃による熱負荷が一カ所に集中することを防ぐため、永久磁石をコレクター領域に設置して、ビーム電子の軌道の拡散を図る。また、真空窓材をサファイアとして、発振周波数が395GHzであること及び最適共振器モードを考慮して、窓の形状の最適化を行う。

このシミュレーションには、福井大学遠赤外領域開発研究センターで独自に開発した計算機コードを用いて、研究分担者 La Agusu が修士課程学生1名とともに担当する。

2) 395GHz/100W/CWジャイロトロン製作

上記の計算機シミュレーションによる最適設計に従って、ジャイロトロン各部品を製作する。装置全体の構成概念図を図1に示す。

2-1 磁場系は、8テスラ超伝導マグネットと3個の補助コイル(gun coil)からなる。(いずれも既存)

2-2 電子銃は、設計に従って外注により製作する。(このための経費を計上している。)

2-3 真空排気装置は、ターボ分子ポンプとイオンポンプで構成する。(いずれも既存)

2-4 真空容器は、コレクター部、空洞共振器(cavity)部、出力窓部を独立に製作し、フランジにて接続し、デマウントブル型とする。このことにより、各部品の交換を可能なようにする。学内のマシンショップにて製作する。

2-5 真空容器内に収容する空洞共振器及びコレクターは、学内のマシンショップにて製作する。(このための消耗品費を計上している。)

2-6 真空窓は、外注により、設計に従って製作する。(このための経費を計上している。)

製作した各部品及び既存の8テスラ超伝導マグネット、真空排気系を用いて図1に示す構成概念図のようにジャイロトロン全体を組み立て、装置の製作を完了する。装置製作にあたって、マシンショップでの製作を当センターの専任技官が担当し、外注による製作を出原、小川が担当し、装置全体の組み立てを研究組織に含まれるメンバー全員と専任技官1名及び修士課程学生1名が担当する。

平成20年度

3) ジャイロトロンの高安定化動作の達成

平成20年度には、前年度に製作を完了したジャイロトロン動作試験を既存の電源を用いて行い、DNP-NMRの光源として必要な長時間にわたる高安定化動作を達成する。

3-1 まず、ジャイロトロン動作の基本パラメーター依存性を調査する。即ち、基本波及び2次高調波動作に対応する各共振器モードの発振開始ビーム電流の磁場依存性及びビームエネルギー依存性を実験的に調べ、計算機シミュレーションの結果と比較検討する。

3-2 この結果に基づき、ジャイロトロン設計モード(TE₂₆またはTE₁₆モード)の2次高調波での単独モード発振を実現し、近隣の

基本波での動作との競合のモードマップを作成する。このマップをもとに、設計モードの単独モード動作の最適条件を求める。

3-3 設計モードでの長時間にわたる安定動作のテストを行う。DNP-NMRの感度向上による蛋白質分子の構造解析には、10時間程度の長時間を要するので、この時間を目途としたテストをおこなう。出力周波数及び振幅のドリフトを抑制するため、空洞共振器の冷却水温を微調整し、また、電子ビーム加速電圧の高安定化を図る。

3-4 さらなる安定化のため、ビームパラメーターのフィードバック制御を試みる。即ち、ビーム電子のエネルギーに出力周波数の変動をフィードバックし、位相制御することにより、周波数の高安定化を達成する。(周波数安定度の目標値: 10⁻⁹) 一方、電子銃の陽極電圧に、出力電力の変動をフィードバックして、出力振幅の高安定化を達成する。(振幅安定度の目標値: 10⁻³) フィードバック制御に必要なPLL回路等は、既存の装置を用いる。

上記のジャイロトロン動作試験、及び出力の高安定化達成の研究は、代表者及び分担者全員と修士課程学生1名が担当する。

3) 周波数可変機構の開発によるDNP-NMR方式の確立

本研究で開発するジャイロトロンは、最終的に600MHz-プロトンNMRに装備され、高感度NMR装置を実現するために用いられる。NMRの感度は、ジャイロトロン周波数に敏感であるので、1GHz程度の周波数可変性が要求される。このため、独自の方式(特許出願中)をジャイロトロンに導入する。本ジャイロトロンは、デマウント型であるので装置の改良は、容易である。この研究項目は、出原が担当する。また、ジャイロトロン出力をNMR装置に結合するためには、ガウシアンモードへの変換と高効率伝送系が必須である。当センターと学術交流協定を締結しているカールスルーエ研究センターのThumm教授との共同研究として、高純度モード動作のための共振器を設計し、これを装備することにより、ガウシアンモードへの変換を容易にする方法を採用する。

4. 研究成果

平成 19 年度

1) 395GHz/100W/CW ジャイロトロン の最適設計

計算機シミュレーションにより、以下の各部品の最適設計を行った。

1-1 既存の 8 テスラ・液体ヘリウムフリー超伝導マグネットと補助磁場コイルを用いた磁場発生装置内での動作解析を行い、3 極マグネット入射型電子銃の最適設計を達成した。

1-2 本研究で開発するジャイロトロンは、2 次高調波動作によるものである。定常状態に達したとき、2 次高調波による動作が基本波動作に打ち勝って単独で生き残る条件を探し、空洞共振器形状の最適設計を行った

1-3 開発するジャイロトロンが、連続(CW)動作することに鑑み、コレクターの設計を入念に行い、電子ビームの衝撃による熱負荷が一カ所に集中することを防ぐと共に、発振周波数が 395GHz であること及び最適共振モードを考慮して、窓の形状の最適化を行った。

2) 395GHz/100W/CW ジャイロトロン の製作
上記の計算機シミュレーションによる最適設計に従ってジャイロトロン の各部品を製作し、ジャイロトロン 全体の組み立てを完了した。

2-1 磁場系は、既存の 8 テスラ・液体ヘリウムフリー超伝導マグネットと 2 個の補助コイルを用いた

2-2 電子銃は、上記の設計に従って外注により製作した。

2-3 真空排気装置は、既存のターボ分子ポンプを用いて構成した。

2-4 真空容器は、コレクター部、空洞共振器部、出力窓部を独立に製作し、フランジにて接続し、デマウントブル型とすることとし、各部品の交換が可能にようにした。学内のマシンショップに依頼して、製作した。

2-5 真空容器内に収容する空洞共振器及びコレクターも、学内のマシンショップにて、製作した

2-6 真空窓は、外注により、上記の設計に従って製作した。

製作した各部品及び既存の 8 テスラ超伝導マグネット、真空排気系を用いてジャイロトロン装置全体を組み立て、装置の製作を完了した。

平成 20 年度

1) 平成 19 年度に作製したジャイロトロン動作の基本パラメーター依存性を調査し、基本波及び 2 次高調波動作に対応する各共振器モードの発振開始ビーム電流の磁場依存性及びビームエネルギー依存性を実験的に調べ、計算機シミュレーションの結果と比較検討した結果、両者のよい一致を得た。

2) この結果に基づき、ジャイロトロン の設計モード(TE_{26} または TE_{16} モード) の 2 次高調波での単独モード発振を実現し、近隣の基本波での動作との競合のモードマップを作成した。このマップをもとに、設計モードの単独モード動作の最適条件を求めた。

3) 設計モードでの長時間にわたる安定動作のテストを行い、DNP-NMR の感度向上による蛋白質分子の構造解析に必要な 10 時間程度の長時間動作のテストを行った。出力周波数及び振幅のドリフトを抑制するため、空洞共振器の冷却水温を微調整し、電子ビーム加速電圧の高安定化を行った。

4) さらに安定化増進のため、ビームパラメーターのフィードバック制御を試み、ビーム電子のエネルギーに出力周波数の変動をフィードバックし、位相制御することにより、周波数の高安定化を達成した。一方、電子銃の陽極電圧に、出力電力の変動をフィードバックして、出力振幅の高安定化を達成した。それぞれ、目標値である 10^{-9} と 10^{-3} の安定化に成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件)

V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Y. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, T. Tatematsu, V. Zapevalov
Review of Subterahertz and Terahertz Gyrodevices at IAP RAS and FIR FU
IEEE Trans. Plasma Sci. 37, no.1, pp.36-43 (2009).

Takashi NOTAKE, Teruo SAITO, Yoshinori TATEMATSU, Akihito FUJII, Shinya

OGASAWARA, La AGUSU, Vladimir N. MANUILOV, Isamu OGAWA and Toshitaka IDEHARA

Achievement of high power sub-terahertz radiations with a second harmonic gyrotron
Plasma Fusion Res. 4 (2009) 011 (2 pages).

T.H. Chang, T. Idehara, I. Ogawa, L. Agusu and S. Kobayashi

Frequency tunable gyrotron using backward-wave components

J. Appl. Phys. 105, 063304 (2009).

T. Idehara, T. Saito, H. Mori, H. Tsuchiya, La Agusu and S. Mitsudo

Long Pulse Operation of the THz Gyrotron with a Pulse Magnet

Int. J. of Infrared and Millimeter Waves **29**, No. 2, pp.131-141 (2008).

T. Idehara, I. Ogawa, T. Saito, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi

Development of THz gyrotrons and application to high power THz technologies
Terahertz Science and Technologies, Vol. 1, no.2, pp.100-106 (2008).

T. Notake, T. Saito, Y. Tatematsu, S. Kubo, T. Shimozuma, K. Tanaka, M. Nishiura, A. Fujii, La Agusu, I. Ogawa, and T. Idehara
Subterahertz gyrotron development for collective Thomson scattering in LHD
Rev. Sci. Instrum. **79** No.10 (2008)
pp.10E732-1 - 10E732-3.

T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi

Development of Terahertz FU CW Gyrotron Series for DNP-NMR

Applied Magnetic Resonance 34 (2008) 265-275.

T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu and S. Sabchevski

The potential of the gyrotrons for development of the sub-terahertz and the terahertz range - a review of novel and prospective application
Thin Solid Films (2008), doi: 10.1016/j.tsf.2008.09.061.

Osamu Watanabe, Hirohisa Tsuchita, Hideaki Mori, La Agusu, Seitaro Mitsudo, Isamu Ogawa, Teruo Saito and Toshitaka Idehara

Development of a Tera Hertz Gyrotron as a Radiation Source

Plasma and Fusion Research 2, S1043 (2007)./Regular Article

V. Zapevalov, V.K. Lygin, O.V. Malygin, M.A. Moiseev, V.I. Khizhnyak, V.P. Karpov, E.M. Tai, T. Idehara, S. Mitsudo, I. Ogawa and T. Saito

High power oscillator of continuous electromagnetic radiation with a frequency of 300 GHz

Radiophysics and Quantum Electronics 50 420-427 (2007)

[学会発表] (計 24 件)

T. Idehara

High power CW THz radiation sources - Gyrotron FU CW Series for application to high power THz technologies (Invited lecture)

Int. Symposium on Terahertz between Japan and Sweden, May 27 - 29, 2008, Tokyo, Japan

T. Idehara

Development and application of THz gyrotrons (Plenary talk)

7 th Int. Workshop on Strong Microwaves: Sources and Applications, July 27 - August 2, 2008, Nizhny Novgorod, Russia.

Toshitaka Idehara, Teruo Saito, Isamu Ogawa, Seitaro Mitsudo and Yoshinori Tatematsu

THz Gyrotrons - FU CW Series for high power THz technologies

The 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2008), M2A3.1267, Caltech, California, USA,

September 14-19, 2008.

T. Idehara, I. Ogawa, H. Mori, S. Kobayashi, S. Mitsudo and T. Saito

A high power THz radiation source - Gyrotron FU CW III for high power THz technologies (Invited talk),
2 nd Japan-Korea Joint Workshop on THz Technology, Tokyo, Japan, October 24-25 (2008).

T. Idehara, H. Tsuchiya, La Agusu, H. Mori, H. Murase, T. Saito, I. Ogawa and S. Mitsudo
Development of CW THz Gyrotrons in FIR FU (Invited paper)

8 th IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2007), 13.1, Kitakyushu, Japan, May 15-17, 2007

T. Idehara, H. Tsuchiya, La Agusu, H. Mori, H. Murase, T. Saito, I. Ogawa and S. Mitsudo
Development of CW THz gyrotrons in FIR FU (Plenary talk)

6 th Int. Kharkov Symp. on Phys. And Eng. Of Microwaves , Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW2007), Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007.

T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi

Development of THz gyrotrons FU CW Series for DNP/NMR (Invited talk)
Dynamic Nuclear Polarization Symposium, University of Nottingham, UK, 29 - 31 August 2007

T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi

Development of THz gyrotrons and their applications to high power THz technologies (Invited paper)
TeraHertz Dynamics probed with X-rays, European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble , 10 - 12 September, 2007

T. Idehara, T. Saito, I. Ogawa, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi
Development of a THz gyrotron FU CW III (Topical talk)

13 th Int. Symp. On Laser-Aided Plasma Diagnostics, Takayama, Japan, 18 - 21 September, 2007

T. Idehara, I. Ogawa, T. Saito, S. Mitsudo, Y. Tatematsu, La Agusu, H. Mori and S. Kobayashi
Development of THz gyrotrons and application to high power THz technologies (Invited talk)
2007 Shenzhen Int. Conf. on Advanced Science and Technology - Terahertz Science and Technology (SICAST2007), Nov. 18-23, 2007, Shenzhen, China

[図書] (計 1 件)

出原敏孝他

テラヘルツ技術総覧

テラヘルツテクノロジーフォーラム編、(有)NGT, 2007.11.29

[産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

出原 敏孝 (IDEHARA TOSHITAKA)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授
研究者番号:80020197

(2)研究分担者

La Agusu

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・機関
研究員

研究者番号:60447703

斉藤輝雄 (SAITO TERUO)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授
研究者番号:80143163

小川 勇 (OGAWA ISAMU)

福井大学・遠赤外領域開発研究センター・教授

研究者番号:90214014